

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS NORMAS ABNT NBR 7190 (1997) E ABNT NBR 7190-1 (2022) NO DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES COM PINO METÁLICO EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE STANDARDS ABNT NBR 7190 (1997) AND ABNT NBR 7190-1 (2022) IN THE DESIGN OF DOWEL TYPE CONNECTIONS IN TIMBER STRUCTURES

CAMILA SANTIAGO COSTA¹ – mila.santiago179@gmail.com

DIONISIO PALHARINI JUNIOR² – dionisio.junior@umfg.edu.br

BRUNA BERNARDI MAIA PALHARINI³ - bruna.maia@umfg.edu.br

1. Acadêmico do curso de graduação do curso Engenharia Civil da Faculdade UMFG.

2. Professor Orientador. Faculdade UMFG - Rod PR-082 KM 468 - Lote 45/46 - Gleba, R. Ribeira, Cianorte - PR, 87200-000.

3. Professora Coorientadora. Faculdade UMFG - Rod PR-082 KM 468 - Lote 45/46 - Gleba, R. Ribeira, Cianorte - PR, 87200-000.

Recebido em 05/12/2024. Publicado em 09/12/2024

RESUMO

As ligações desempenham um papel fundamental em uma estrutura, são consideradas pontos críticos de uma estrutura, pois influenciam diretamente o seu desempenho. Tratando-se do dimensionamento em ligações em estruturas de madeira, a norma brasileira apresentou em 2022 uma atualização dos equacionamentos, de modo a garantir que as forças resistentes sejam superiores as solicitantes por meio de cálculos mais refinados. No caso específico de ligações com pino metálico em estruturas com interface madeira-madeira e madeira-aço, a ABNT NBR 7190 (1997) apresentava apenas dois equacionamentos, voltados para a falha de embutimento da madeira e falha por flexão do pino metálico. No entanto a revisão da ABNT 7190-1 (2022) modificou este procedimento passando a abordar estes dois aspectos em conjunto, levando em consideração o número de seções de corte da ligação e a espessura da chapa de aço para casos de ligações entre madeira-aço. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo comparar as duas normas para determinação da força resistente de ligação com pino metálico, de modo a verificar qual método apresenta ser mais conservador. Para a comparação dos métodos de cálculo foi feita a parametrização das ligações, variando o diâmetro do pino metálico, a espessura da peça de madeira e a resistência ao embutimento da madeira. Os resultados mostraram que as ligações entre madeira e aço, com chapas de aço grossas, foram as mais resistentes. Além disso, observou-se que a ABNT NBR 7190 (1997) ainda é mais conservadora.

Palavras-Chave: Ligações em madeira, pino metálico, chapa metálica.

ABSTRACT

Connections play a fundamental role in a structure and are considered critical points, as they directly influence its performance. When it comes to the design of connections in timber structures, the Brazilian standard underwent an update in 2022, refining the equations to ensure that the resisting forces are greater than the applied ones through more precise calculations. In the specific case of connections with metal dowels in wood-wood and wood-steel interfaces, the ABNT NBR 7190 (1997) standard presented only two equations, focusing on wood embedment failure and metal dowel bending failure. However, the revision of ABNT NBR 7190-1 (2022) changed this procedure by addressing these two aspects together, taking into account the number of shear planes in the

connection and the thickness of the steel plate for wood-steel connections. Thus, the present study aims to compare the two standards for determining the resisting force of connections with metal dowels, to assess which method is more conservative. For the comparison of calculation methods, connections were parameterized by varying the diameter of the metal dowel, the thickness of the wooden piece, and the wood embedment strength. The results showed that wood-steel connections with thick steel plates were the most resistant. Additionally, it was observed that the ABNT NBR 7190 (1997) standard is still more conservative.

Keywords: Timber connections, metal dowel, steel plate.

1 INTRODUÇÃO

Devido aos avanços da utilização da madeira como material estrutural, surgem demandas por estudos mais aprofundados sobre seu dimensionamento. Essa necessidade é impulsionada pela busca por soluções que garantam resistência, durabilidade e segurança nas estruturas de madeira. Além disso, avanços também em tratamentos térmicos e químicos têm melhorado suas propriedades, tornando-a ainda mais viável para diferentes aplicações, mesmo em condições adversas (Menezes, 2023).

Nesse contexto, a importância das ligações em sistemas estruturais de madeira se destaca. Elas desempenham um papel fundamental, tanto para garantir a integridade da estrutura quanto para adaptar as peças às dimensões do projeto. As ligações são pontos críticos, pois influenciam diretamente no desempenho global da estrutura. Portanto, é essencial dedicar atenção ao seu dimensionamento, assegurando que proporcionem a resistência e a estabilidade necessárias (Maia, 2016).

Diante dessa importância, surge a demanda por uma revisão da norma ABNT NBR 7190 (1997), substituída pela ABNT NBR 7190-1 (2022), justificando a realização deste estudo. Nessa atualização de norma, houveram mudanças significativas no modelo de dimensionamento de ligações por pinos metálicos. Na versão de 1997, a norma considerava apenas dois possíveis modos de falha para essas conexões, não diferenciava o equacionamento para ligações em corte simples e corte duplo, e também não havia distinção se a ligação era entre peças de madeira ou entre peça de madeira e chapa metálica. Na versão de 2022, o modelo de dimensionamento considera vários modos de falha, além de diferenciar equações para corte simples e duplo, e diferencia também as equações para ligação entre peças de madeira e entre peças de madeira e chapa metálica.

Com isso, o objetivo geral deste trabalho é de comparar o dimensionamento de ligações por pinos metálicos proposto pela ABNT NBR 7190 na atualização de 2022 com a versão de 1997. Para isso, será comparado os resultados obtidos em modelos teóricos, verificando qual modelo é mais

conservador para o dimensionamento considerando corte simples e duplo entre peças de madeira e peças de madeira e chapa metálica de modo a verificar se a versão de 1997 que apresenta ser mais simplificada atenderia as demandas de projeto com segurança.

Para a análise dos cálculos, os objetivos específicos incluem a avaliação da resistência das ligações considerando parâmetros pré-determinados, como espessura das partes conectadas, diâmetro dos pinos metálicos e resistência ao embutimento da madeira. Em cada análise, apenas um parâmetro será variado enquanto os demais serão mantidos constantes, possibilitando uma avaliação isolada e a comparação dos resultados.

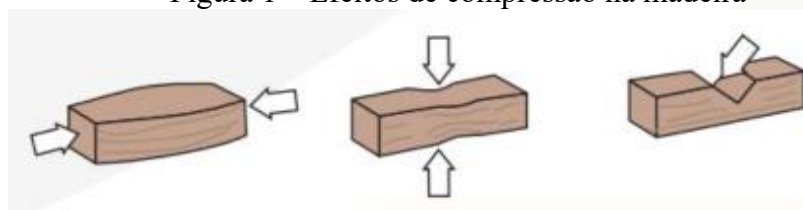
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Principais propriedades da madeira para uso estrutural

Por se tratar de um material heterogêneo e anisotrópico, as propriedades físicas e mecânicas da madeira podem variar em relação à direção das fibras. Deve-se considerar as propriedades específicas em cada direção solicitada (Almeida, 2012).

A compressão na madeira pode ocorrer de forma paralela a direção das fibras, cujo sua estrutura celular é capaz de resistir melhor a esse esforço, ocasionando menor deformação. Em situações de compressão normal a direção das fibras, a madeira possui menor resistência, gerando efeito de esmagamento das fibras. Para solicitação inclinadas, utiliza-se o modelo de Hankinson para determinação de valores intermediários (Carneiro, 2021). Podemos observar respectivamente os modos de compressão gerados na madeira conforme demonstrado pela figura 1.

Figura 1 – Efeitos de compressão na madeira

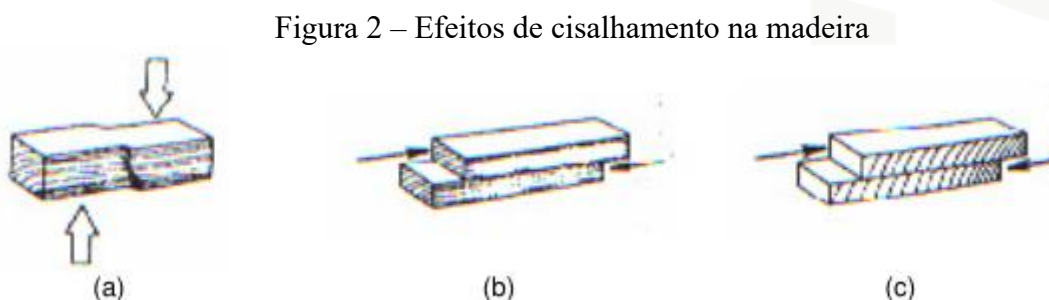


Fonte: Ritter (1990 apud Freitas, 2015).

Segundo do Valle, *et al.* (2012), o cisalhamento pode ocorrer de três formas distintas. A primeira quando a força é aplicada perpendicularmente as fibras, porém essa forma de solicitação não é considerada crítica, uma vez que, antes de ocorrer falha por cisalhamento a peça tende a apresentar problemas de esmagamento devido a compressão normal (Figura 2a).

A segunda ocorre por meio da força aplicada no sentido longitudinal das fibras (cisalhamento horizontal), sendo considerado o mais crítico, pois sua ruptura se dá devido ao escorregamento entre as células da madeira (Figura 2b).

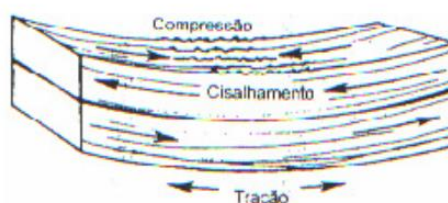
Quando a força é aplicada perpendicular às linhas dos anéis de crescimento (cisalhamento rolling) as células da madeira tendem a rolar uma sobre as outras de forma transversal em relação ao eixo longitudinal (Figura 2c).



Fonte: Ritter (1990 apud do Valle,2012).

A ruptura por flexão ocorre seguida de um conjunto de minúsculas falhas de compressão e seu esmagamento. Resultando no aumento da área tracionada na seção e a redução da área comprimida, e o aumento de tensões de tração, podendo ocorrer um rompimento por tração, conforme demonstrado pela figura 3 (do Valle, *et al.* 2012).

Figura 3 – Efeitos de flexão na madeira



Fonte: Ritter (1990 apud do Valle,2012).

Os modos de ruptura da madeira manifestam-se de forma frágil para situações de tração normal ao sentido das fibras e principalmente para situações de tração e cisalhamento paralelo ao sentido das fibras. Na compressão paralela, a ruptura tende a ocorrer de forma plástica, próxima à carga de ruptura. Por outro lado, na compressão normal às fibras, ocorre em geral uma ruptura dúctil, no qual as deformações apresentam aumento contínuo ao aumento das cargas (Moreira, 2004).

As classes de resistência da madeira segundo a ABNT NBR 7190 (1997) e ABNT NBR 7190-1 (2022) são divididas de acordo com as diferentes espécies de madeira, conforme demonstrados nas Tabelas 2 e 3, que correspondem a antiga norma ABNT NBR 7190 (1997) e as Tabelas 4, 5 e 6 que

correspondem a norma atualizada ABNT NBR 7190-1 (2022). Essa divisão tem como objetivo auxiliar na escolha do material a ser utilizado de acordo com solicitação do projeto estrutural.

Com relação à densidade, a madeira apresenta duas definições diferentes: densidade básica e densidade aparente. A densidade básica refere-se à massa específica convencional, resultante da divisão da massa seca pelo volume saturado e a densidade aparente é determinado com base no teor de umidade padrão com referência de 12%. Conforme podemos observar pela Tabela 5 e Tabela 6, a densidade da madeira pode variar de espécie para espécie, ou até mesmo de árvore para árvore (Carneiro, 2021).

Tabela 2– Classes de resistência das coníferas conforme ABNT NBR 7190 (1997)

Coníferas					
(Valores na condição-padrão de referência U=12%)					
Classes	f_{c0k}	f_{vk}	$E_{c0,m}$	$\rho_{bas,m}$	$\rho_{aparente}$
	MPa	MPa	MPa	kg/m ³	kg/m ³
C 20	20	4	3500	400	500
C 25	25	5	8500	450	550
C 30	30	6	14500	500	600

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190 (1997, p.16).

Tabela 3– Classes de resistência das dicotiledôneas conforme ABNT NBR 7190 (1997)

Dicotiledôneas					
(Valores na condição-padrão de referência U=12%)					
Classes	f_{c0k}	f_{vk}	$E_{c0,m}$	$\rho_{bas,m}$	$\rho_{aparente}$
	MPa	MPa	MPa	kg/m ³	kg/m ³
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190 (1997, p.16).

Tabela 4– Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos conforme ABNT NBR 7190-1 (2022)

					(continua)
Classes	f_{c0k}	$f_{v0,k}$	$E_{c0,med}$	Densidade a 12%	
	Mpa	Mpa	Mpa	kg/m ³	
D20	20	4	10000	500	
D30	30	5	12000	625	
D40	40	6	14500	750	
D50	50	7	16500	850	

Tabela 4– Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos conforme ABNT NBR 7190-1 (2022)

Classes	f_{c0k}	$f_{v0,k}$	$E_{c0,med}$	(conclusão) Densidade a 12%
	Mpa	Mpa	Mpa	kg/m ³
D60	60	8	19500	1000

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190-1 (2022, p.12).

Tabela 5– Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais da classe de coníferas conforme ABNT NBR 7190-1 (2022)

Símbolo	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	
Propriedades de resistência Mpa													
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Densidade kg/m ³													
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Nota 1 Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.

Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190-1 (2022, p.12).

Tabela 6 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais da classe de folhosas conforme NBR 7190-1 (2022)

Símbolo	D88	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
	Propriedades de resistência Mpa								
Flexão	$f_{b,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0

Tabela 6 – Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais de classes folhosas conforma NBR 7190-1 (2022)

	Símbolo	D88	D24	D30	D35	D40	D50	D60	(conclusão) D70
Densidade kg/m ³									
Densidade característica	Pk	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	Pm	570	580	640	650	660	750	840	1080

Nota 1 Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.

Nota 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190-1 (2022, p.12).

2.1.1 Umidade da Madeira

A madeira é reconhecida como um material estrutural heterogêneo e suas propriedades variam de acordo com o teor de umidade inserido, por isso são determinadas sob uma condição padrão, cujo seu teor de umidade corresponda a 12%. Por isso, é essencial que se realize a correção da resistência e rigidez da madeira para a umidade padrão (Almeida, 1997), conforme demonstrado pelas Equações 7 e 8 propostas pela ABNT NBR 7190-1 (2022). A Equação 1 deve ser utilizada na determinação da resistência a umidade padrão de 12%. Já com a Equação 2 é possível determinar a rigidez a umidade padrão de 12%.

$$f_{12} = f_{u\%} \left[1 + \frac{3(u-12)}{100} \right] \quad (1)$$

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2(u-12)}{100} \right] \quad (2)$$

Sendo:

f_{12} e E_{12} correspondem respectivamente a resistências e a rigidez da madeira referente a umidade de equilíbrio a 12%;

$f_{u\%}$ e $E_{u\%}$ correspondem respectivamente a resistências e a rigidez da madeira referente a umidade ambiente inserida;

u corresponde a umidade ambiente.

Estando na umidade padrão para determinação da sua resistência e rigidez, a umidade da madeira pode variar em relação ao ambiente exposto, conseqüentemente há uma variação de suas propriedades de resistência e rigidez que foram determinadas anteriormente. Portanto, sua umidade de equilíbrio é definida em quatro classes, conforme demonstrado abaixo pela Tabela 7, de modo a

auxiliar na escolha de seus métodos de tratamento e coeficientes de ponderação para resistência e rigidez.

Tabela 7 - Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio máxima da madeira (U_{eq})
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12 %
2	$65 \% < U_{amb} \leq 75 \%$	15 %
3	$75 \% < U_{amb} \leq 85 \%$	18 %
4	$U_{amb} > 85 \%$ durante longos períodos	$\geq 25 \%$

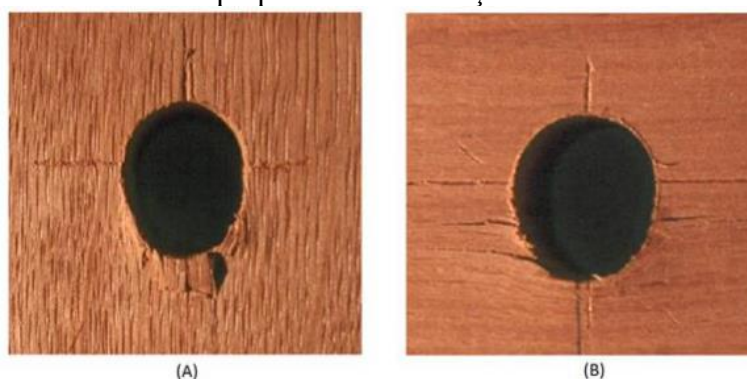
Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190-1(2022, p.10).

2.1.2 Resistência ao embutimento da madeira

A resistência ao embutimento da madeira é um fenômeno que ocorre quando uma peça de madeira é submetida a compressão, quando há presença de um pino metálico embutido sobre ela, o que faz com que surja tensões de contato que se conduzem a gerar deformações da peça (Carneiro, 2021).

Blaß e Schädle (2011 *apud* Tomaz, 2015) apontam que “essas deformações podem ocorrer paralela ou perpendicular as fibras da madeira dependendo da direção da força”. A Figura 4 demonstra como ocorre essas deformações.

Figura 4 - A imagem (A) demonstra o embutimento na direção das fibras e em (B) o embutimento perpendicular a direção das fibras



Fonte: Blaß e Schädle (2011 *apud* Tomaz,2015).

Segundo Aghayere (2007 *apud* Almeida, 2012) a direção mais resistente da madeira é a direção paralela as fibras, devido à forma com que as fibras estão distribuídas na madeira, alinhadas de acordo com a direção longitudinal do tronco da árvore.

Segundo a ABNT NBR 7190-1 (2022) a resistência ao embutimento na madeira deve ser determinada por meio de ensaio, ou em casos de ligação com pinos metálicos entre peças de madeira

e chapas de aço, e ligações entre peças de madeira pode ser determinada de duas formas diferentes a depender do diâmetro do pino. Quando se utiliza pregos com seu diâmetro menor que 8 mm, para madeira serrada a resistência ao embutimento irá variar se houver ou não a pré-furação. A Equação 3 determina a resistência ao embutimento desconsiderando a pré-furação, e a Equação 4 considera este processo.

$$f_{e,k} = 0,082 \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (\text{em N/mm}^2) \quad (3)$$

$$f_{e,k} = 0,082 (1 - 0,01 \cdot d) \rho_k \quad (\text{em N/mm}^2) \quad (4)$$

No caso de pregos com diâmetro maior que 8 mm e parafusos com diâmetro até 30 mm, sujeitos a um ângulo α às fibras, a ABNT NBR 7190-1 (2022) sugere as Equações de 5 a 7 para determinar a resistência ao embutimento.

$$f_{e,\alpha k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

$$f_{e0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (\text{em N/mm}^2) \quad (6)$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & (\text{Para madeiras de coníferas}) \\ 1,30 + 0,015d & (\text{Para painéis de LVL}) \\ 0,90 + 0,015d & (\text{Para madeiras folhosas}) \end{cases} \quad (7)$$

Sendo:

ρ_{med} é a densidade média;

ρ_k é a densidade característica;

$f_{e,k}$ é a resistência ao embutimento da madeira;

d é o diâmetro.

Conforme a NBR 7190 (1997), a resistência ao embutimento deve ser determinada por meio de ensaios pré-determinado, mas em casos em que não seja possível realiza-los, a norma permite a utilização das Equações 8 e 9, a depender da direção das fibras.

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (8)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_e \quad (9)$$

Sendo:

$f_{c0,d}$ a resistência de cálculo à compressão paralela às fibras;

$f_{e0,d}$ a resistência de cálculo de embutimento na madeira, direção paralela às fibras;

$f_{e90,d}$ a resistência de cálculo de embutimento na madeira, direção normal às fibras;

α_e é o coeficiente fornecido pela tabela 8, da ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 8 – Valores de α_e

Diâmetro do pino (cm)	$\leq 0,62$	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2
Coeficiente (α_e)	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33
Diâmetro do pino (cm)	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	$\geq 7,5$
Coeficiente (α_e)	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,0

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7190 (1997, p.21).

2.2 Propriedade dos pinos metálicos

Os pinos metálicos podem ser caracterizados como elementos de fixação fabricados em aço, composto por um eixo cilíndrico, cujo seu diâmetro é inferior ao seu comprimento. Exemplos desse tipo de pino são os parafusos e pregos. A ligação de madeira com pino metálico é a mais utilizada, devido ao seu baixo custo e maior disponibilidade no mercado, além disso não necessita de mão de obra especializada (Maia, 2016).

Os parafusos podem ser compostos por dois tipos: parafusos auto atarraxante e os parafusos de porcas e arruelas, sendo o primeiro mais utilizado na marcenaria e quando aplicado em estruturas de madeira, usualmente em ligações com corte simples. Já o segundo é utilizado em estruturas de madeira tanto em corte simples e quanto em corte duplo (Pfeil e Pfeil, 2003).

Os parafusos mais utilizados para ligações em estrutura de madeira e chapas de aço, conforme a ABNT NBR 8800 (2008), é o ASTM A307, A325 e A490 com rosca UNC, porém permite o uso de parafusos ISO 898-1 Classe 4.0 e ISO 4016 Classe 8.8 e 10.0, desde que eles atendam às exigências das normas ASTM, com as adaptações necessárias. Também englobam barras redondas rosqueadas, com roscas que atendam aos padrões especificados.

A ABNT NBR 8800 (2008) fornece o tipo dos materiais usados para fabricação dos parafusos, assim como valores mínimos de resistência ao escoamento, resistência à ruptura e seus diâmetros respectivamente conforme demonstrado pela Tabela 9.

Tabela 9 - Materiais usados em parafusos

Especificação	f_{yb}	f_{ub}	Diâmetro d_b	
	MPa	Mpa	Mm	pol
ASTM A307	-	415	-	$1/2 \leq d_b \leq 4$
ISO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A325 ^a	635	825	$16 \leq d_b \leq 24$	$1/2 \leq d_b \leq 1$
	560	725	$24 \leq d_b \leq 36$	$1 \leq d_b \leq 1 1/2$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d_b \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d_b \leq 36$	$1/2 \leq d_b \leq 4$
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d_b \leq 36$	-

^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 8800 (2008, p.110).

2.3 Aço estrutural conforme ABNT NBR 8800:2008

O aço-carbono é uma liga composta principalmente por ferro e carbono. A quantidade de carbono presente influencia diretamente as propriedades mecânicas do material. À medida que o teor de carbono aumenta, a resistência à tração do aço também cresce, tornando-o mais resistente. No entanto, essa maior resistência vem acompanhada de uma redução na ductilidade. Os aços utilizados em estruturas metálicas apresentam valores semelhantes a resistência de tração e compressão (Pfeil e Pfeil, 2021).

Há também os aços de baixa liga, cujo são compostos por aços-carbono com elementos de liga como cromo, nióbio, cobre, entre outros, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, permitindo a soldagem sem necessidades de precauções especiais (Pfeil e Pfeil, 2021).

O tipo de aço utilizado em peças estruturais deve atender uma resistência ao escoamento máxima de 450 MPa e sua relação de resistência de ruptura (f_u) e ao escoamento (f_y) não pode ser inferior a 1,18.

Devido a essa condição inicial, a norma ABNT NBR 8800 (2008) apresenta uma tabela que detalha os valores nominais mínimos de resistência ao escoamento e à ruptura para uso estrutural em chapas. São denominadas como chapas de aço-carbono, baixa liga com alta resistência mecânica e, aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes a corrosão atmosférica, conforme apresentado pela Tabela 10.

Tabela 10 – Chapas de aço de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Grupo de perfil ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u Mpa
Aço-carbono	A36	$t \leq 200$ mm	-	250	400 a 550
		$t \leq 150$ mm	42	290	415
		$t \leq 100$ mm	50	345	450
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	$t \leq 50$ mm	55	380	485
		$t \leq 31,5$ mm	60	415	520
		$t \leq 31,5$ mm	65	450	550
		$t \leq 19$ mm	-	345	480
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A242	$19 \text{ mm} < t \leq 37,5$ mm	-	315	460
		$37,5 \text{ mm} < t \leq 110$ mm	-	290	435
		$t \leq 100$ mm	-	345	480
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A588	$100 \text{ mm} < t \leq 125$ mm	-	315	460
		$125 \text{ mm} < t \leq 200$ mm	-	290	435

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 8800 (2008, p.109).

2.4 Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira e aço

As ligações em estruturas têm como objetivo unir suas partes, sendo estes pontos de união consideradas como pontos críticos de sua estrutura, por esse motivo é necessário ter domínio nos cálculos e métodos construtivos aplicados para seu dimensionamento (Carneiro, 2021).

Segundo Tomaz (2015), as ligações em estruturas de madeira podem ser categorizadas em três grupos: entalhes, produtos químicos e pinos metálicos. Os entalhes são utilizados com o objetivo de transmitir esforços de compressão nas ligações, e não suportam esforços de tração. Produtos químicos consistem em substâncias que colam as peças e apresentam um comportamento frágil, como exemplo as colas de poliuretano, resina epóxi e acetato de polivinil. Os pinos metálicos tendem a resistir tanto a esforços de tração quanto a esforços de compressão além de apresentar comportamento dúctil.

A resistência de uma ligação entre peça de madeira e pino metálico, conforme teoria de Johansen (1949), está relacionada a dois modos de falha principais, que correspondem a resistência da madeira ao embutimento e a resistência ao cisalhamento do pino metálico por meio da flexão, que é causada pelas tensões aplicadas sobre o pino após sua fixação, levando-o a seu escoamento e conseqüentemente conforme o aumento das tensões, por fim a falha por flexão do pino.

A resistência também leva em consideração a seção de corte que o pino metálico está submetido, sendo ele corte simples quando apresenta apenas uma seção de corte para o pino metálico, ou seja está submetido a esforços entre duas peças de madeira e o corte duplo cujo o pino apresenta duas seções de corte, ou seja está submetido entre três peças de madeira.

Para a determinação da resistência da ligação com pinos metálicos, a ABNT NBR 7190 (1997) leva em consideração apenas os modos de falha propostos por Johansen (1949), envolvendo flexão do pino ou embutimento da madeira, de forma separada. No entanto a norma atualizada ABNT NBR 7190-1 (2022) passou a considerar uma combinação desses fenômenos, além de levar em conta o número de seções de corte. Isso resultou em um maior número de modos de falha, descritos nas equações de 15 a 35.

Nas subseções 2.5 e 2.6 do presente trabalho são apresentados os equacionamentos propostos pela norma brasileira de dimensionamento de estruturas de madeira, em sua versão de 1997 e pela atualização de 2022. Por não ser o foco deste trabalho, não será discutido as atualizações sobre as demais disposições construtivas, como espaçamentos, pré-furações, diâmetros mínimos, entre outros.

2.5 Dimensionamento de ligações com pinos metálicos segundo ABNT NBR 7190 (1997)

O equacionamento apresentado pela ABNT NBR 7190 (1997) para determinação de resistência de ligações com pinos metálicos é o mesmo para ligações entre peças de madeira e entre peças de madeira e chapas de aço. Além disso, não há diferenciação para ligações com corte simples ou corte duplo.

O modelo de cálculo apresentado pela norma considera que a resistência calculada é dada para um pino com apenas uma seção de corte. Assim, para determinar a resistência total da ligação é necessário somar as resistências referentes a todas as seções de corte dos pinos envolvidos.

No entanto, a norma considera que a disposição e o número de pinos utilizados influenciam na resistência total da ligação. Nas ligações que apresentam até oito pinos dispostos paralelamente a força aplicada, a resistência será determinada pela soma das resistências de cada pino. Porém, em ligações que apresentam mais de oito pinos, deve ser considerado apenas 2/3 das resistências dos pinos complementares, conforme a equação 10, sendo “n” sendo o número de pinos efetivos e n_0 a quantidade efetiva de pinos considerados para resistência da ligação.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} \cdot (n - 8) \quad (10)$$

Para determinação da resistência da ligação, na versão de 1997 da norma brasileira de estruturas de madeira, apenas dois modos de falha são considerados: embutimento da madeira ou flexão do pino. A identificação do modo de falha é realizada por meio da análise dos parâmetros β e β_{lim} , conforme descrito nas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\beta = \frac{t}{d} \tag{11}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \tag{12}$$

Sendo:

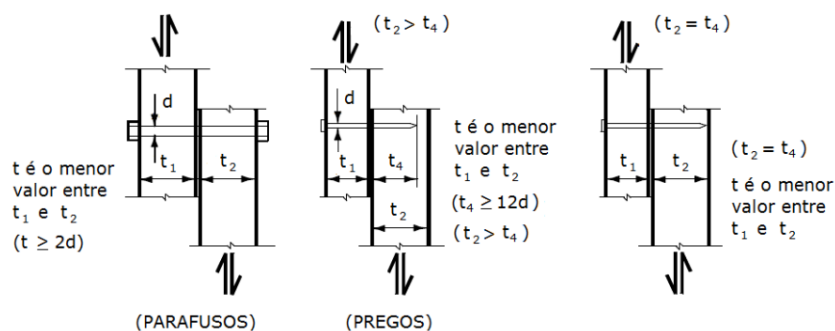
t a espessura convencional da madeira, conforme ilustrado nas Figuras 5 a 7, sendo a espessura menor entre t₁ e t₂ para corte simples, e para ligações corte duplo é a menor espessura representada por t₁ e t_{2/2} para a primeira seção, e em seguida a menor espessura entre t_{2/2} e t₃ na outra seção;

d é o diâmetro do pino;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do pino (f_{yk}/γ_S), com γ_S= 1,1;

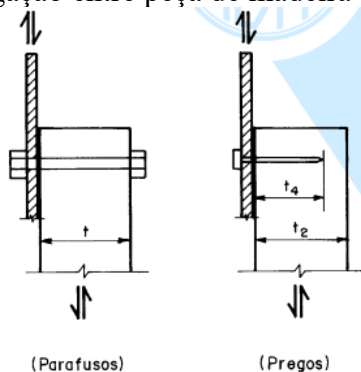
f_{ed} é a resistência de cálculo ao embutimento.

Figura 5 – Ligação entre duas peças de madeira.

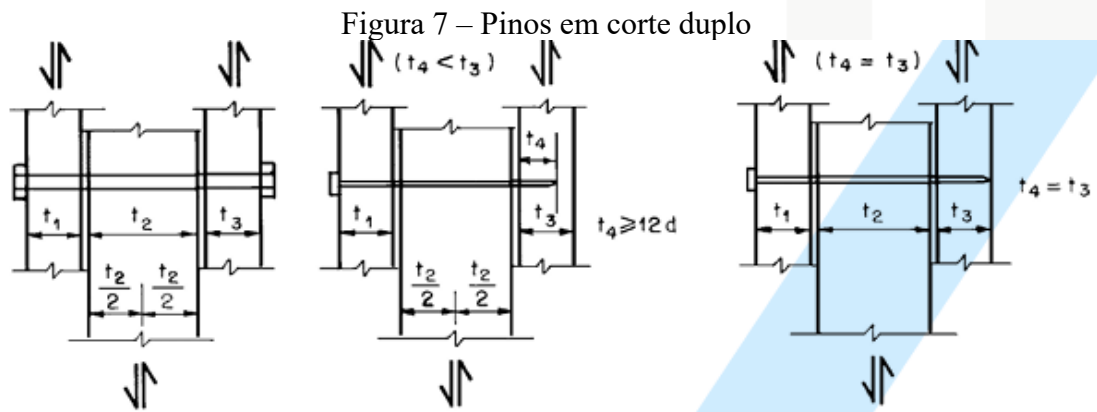


Fonte: ABNT ABNT NBR 7190 (1997, p.34).

Figura 6 – Ligação entre peça de madeira e peça metálica



Fonte: ABNT ABNT NBR 7190 (1997, p.34).



Fonte: ABNT ABNT NBR 7190 (1997, p.35).

A resistência de cálculo da ligação $R_{vd,1}$ depende da comparação dos parâmetros β e β_{lim} . Quando $\beta \leq \beta_{lim}$, considera-se falha por embutimento da madeira, sendo a resistência determinada para uma única seção de corte calculada pela Equação 13.

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (13)$$

Caso $\beta > \beta_{lim}$, considera-se falha por flexão do pino metálico, sendo a resistência determinada para uma única seção de corte calculada pela Equação 14.

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \text{ com } \beta = \beta_{lim} \quad (14)$$

2.6 Dimensionamento de ligações com pinos metálicos segundo ABNT NBR 7190-1 (2022)

Na versão de 2022 da ABNT NBR 7190, o equacionamento apresentado para determinação de resistência de ligações com pinos metálicos é distinto para ligações entre peças de madeira e entre peças de madeira e chapas de aço, conforme apresentado nas subseções 2.6.1 e 2.6.2. Além disso, há diferenciação para ligações corte simples ou corte duplo.

A resistência característica das ligações calculadas conforme a ABNT NBR 7190-1 (2022), apresentadas nos Quadros 1 e 2, ainda é obtida considerando-se um pino e uma seção de corte. Contudo, nessa versão, a norma apresenta a Equação 15 para esclarecer como deve ser realizado o cálculo da resistência final da ligação, que corrige o número de seções de corte para os casos de ligações com corte duplo ou mais.

$$R_k = F_{V,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (15)$$

Sendo:

$F_{v,Rk}$ a resistência característica de um pino, correspondente a uma seção de corte;

n_{sp} o número de seções de corte por pino metálico;

n_{ef} o número efetivo de pinos por ligação.

A norma atualizada manteve a consideração de que o número de pinos utilizados influencia na resistência total da ligação, do mesmo modo que era tratado na versão de 1997. Com isso, o número efetivo de pinos por ligação (n_{ef}) pode ser determinado pela equação 8, apresentada na seção anterior.

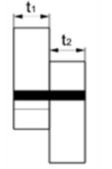
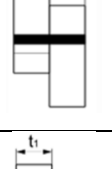
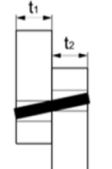
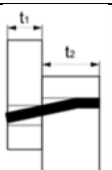

As equações propostas pela ABNT NBR 7190-1 (2022) são baseadas nos possíveis modos de falha das conexões, sendo um conjunto de combinações de falha por embutimento na madeira e falha por flexão do pino metálico.

2.6.1 Dimensionamento de ligação com pino metálico entre peças de madeira

O cálculo da resistência de ligações entre peças de madeira utilizando pinos metálicos proposto pela ABNT NBR 7190-1 (2022) levam em consideração os modos de falha. Estes são divididos para uma única seção de corte e para duas seções de corte, conforme as Equações de 16 a 25.


Quadro 1- Ligações em madeira para corte simples

(continua)

	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	16
	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d\beta$	17
	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	18
	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot My,k}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	19
	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (1 + 2\beta) \cdot My,k}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	20

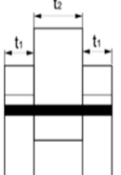
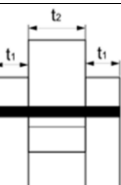
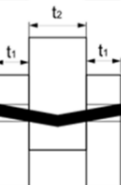
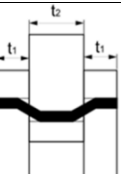
Quadro 1- Ligações em madeira para corte simples

(conclusão)

	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \left[\sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	<p>21</p>
---	---	-----------

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Quadro 2 - Ligações em madeira para corte duplo

	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	<p>22</p>
	$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d\beta$	<p>23</p>
	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4\beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	<p>24</p>
	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \left[\sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	<p>25</p>

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Sendo:

t_1 corresponde à espessura de uma das peças em ligações com uma seção de corte, ou a penetração do pino em ligações com dupla seção.

t_2 corresponde à penetração do pino em ligações com uma seção de corte, ou a espessura da peça central em dupla seção;

$f_{e,1,k}$ e $f_{e,2,k}$ são os valores de resistência característica ao embutimento da madeira da peça 1 e 2 respectivamente;

β é o coeficiente de relação entre as resistências ao embutimento da madeira da peça 1 e 2;

$M_{y,k}$ é momento característico resistente à flexão do pino;

d é o diâmetro do pino.

O momento resistente característico do pino metálico pode ser calculado de acordo com a Equação 26.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (26)$$

Sendo:

$f_{u,k}$ é a última resistência de tração característica do aço do pino metálico, expressa em megapascal (Mpa), determinada pelas normas ABNT NBR ISSO 898-1, ASTM A-307, ASTM A-325, ASTM A-490 e ABNT NBR 5589;

d é o diâmetro nominal do pino metálico (mm), determinado pela ABNT NBR 8800.

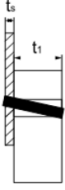
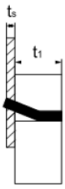
A força característica da ligação por plano de corte e por pino metálico deve ser selecionada como o menor dos valores calculados as equações. Assim, para determinar a resistência final, deve-se recorrer à Equação 15.

2.6.2 Dimensionamento de ligação com pino metálico entre peças de madeira e chapas de aço

A ABNT ABNT NBR 7190-1 (2022) estabelece que as ligações possuem modos de falha definidos pela espessura (t_s) das chapas de aço, que devem ser categorizadas como chapas finas e grossas. São consideradas como chapas de aço finas aquelas que possuem espessura menor ou igual a 0,5 vezes o diâmetro (d) do pino metálico e, chapas de aço grossas aquelas que apresentam espessura maior ou igual a “ d ” e seu diâmetro de pré-furação menor ou igual e $1,1d$.

O modelo de cálculo proposto pela ABNT NBR 7190-1 (2022) é composto pelas equações de 27 a 35, baseadas nos modos de falha. Deverá ser considerada como resistência característica por plano de corte e por pino metálico, o menor valor dentre os resultados encontrados.

Quadro 3- Ligações com chapas finas em cortes simples

	$F_{V,Rk} = 0,4 \cdot f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (27)$	
	$F_{V,Rk} = 1,15 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (28)$	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Quadro 4 - Ligações com chapas grossas em cortes simples e para ligações com chapa de aço central de qualquer espessura, em dupla seção de corte

	$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (29)$	
	$F_{V,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (30)$	
	$F_{V,Rk} = 2,3 \cdot [\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d}] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (31)$	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Quadro 5 - Ligações com duas chapas laterais caracterizadas como finas, em corte duplo

	$F_{V,Rk} = 0,5 \cdot f_{e2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (32)$	
	$F_{V,Rk} = 1,15 \cdot [\sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{e2,k} \cdot d}] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (33)$	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Quadro 6 - Ligações com duas chapas laterais caracterizadas como grossas, em corte duplo

	$F_{V,Rk} = 0,5 \cdot f_{e2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (34)$	
	$F_{V,Rk} = 2,3 \cdot [\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e2,k} \cdot d}] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (35)$	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (2022)

Sendo:

t_1 é a menor espessura dos elementos de madeira laterais, em cortes simples e duplo;

t_2 é a espessura do elemento central para os casos de corte duplo;

$f_{e1,k}$ e $f_{e2,k}$ são as resistências ao embutimento da madeira 1 e 2, cujo seu cálculo foi demonstrado em 2.1.2;

$M_{y,Rk}$ é o momento característico resistente do parafuso.

$F_{ax,Rk}/4$ corresponde ao efeito de confinamento gerado pela compressão das arruelas nas laterais externas da ligação, pela resistência provocada pela remoção de pregos e parafusos de rosca soberba, ou ao embutimento provocado pelos pinos na lateral externa da peça. Segundo a NBR 7190-1 (2022) essa contribuição desconsidera o fator de atrito e deve ser limitada as seguintes porcentagens:

- Pregos cilíndricos lisos: 15%;
- Pregos anelados: 25%;
- Parafusos passantes com porca e arruelas: 25%;
- Parafusos de rosca soberba: 100%;
- Pinos metálicos ajustados: 0%.

Em ligações parafusadas, o valor de $F_{ax,Rk}$ pode ser determinado pelo menor valor da resistência a tração do parafuso e a resistência ao embutimento da arruela, em ligações com pregos e parafusos de rosca soberba utiliza-se o menor valor entre a resistência a tração e a resistência ao embutimento da cabeça do prego/parafuso na madeira.

A norma ainda estabelece que a resistência ao corte do pino metálico e a resistência da chapa de aço devem ser verificadas conforme a ABNT NBR 8800 (2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo a revisão bibliográfica e a análise comparativa entre os modelos de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira apresentados na versão de 1997 e 2022 da ABNT NBR 7190.

A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de analisar os critérios normativos atualizados e, verificar os parâmetros empregados no dimensionamento da ligação em estruturas de madeira e aço por pino metálico de modo a verificar qual o método mais conservador.

Para análise comparativa com base nos modelos de cálculo da revisão bibliográfica, foram definidos modelos de ligações para aplicação dos métodos de dimensionamento. Esses modelos levam em consideração que, tanto pela ABNT NBR 7190 (1997) quanto pela ABNT NBR 7190-1

(2022), as principais variáveis que influenciam os cálculos são a espessura convencional da madeira, a resistência ao seu embutimento, o diâmetro e a resistência última ao escoamento do pino metálico.

Para a comparação entre normas, foi considerado ligações de corte simples e duplo entre peças de madeira, e entre peça de madeira e aço. Para todos os casos a resistência a ruptura do parafuso foi fixada em $F_u=540\text{MPa}$. Foram variadas isoladamente as variáveis: diâmetro do pino metálico (6,3mm a 15,9mm), espessura das partes conectadas (25mm a 80mm) e resistência ao embutimento da madeira (15 a 35 Mpa). O Quadro 7 apresenta a parametrização das amostras de conexões em corte simples e duplo analisadas, abrangendo todas as situações em casos de ligações entre madeira e aço com pino metálico cujo foram baseadas no trabalho de Menezes (2023). Vale ressaltar que para ligações madeira-aço, foi realizada separadamente o cálculo para chapas finas e grossas, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento em cada configuração.

Quadro 7 – Amostra ligações em corte simples e duplo

Parâmetros variando o diâmetro	Parâmetros variando a espessura	Parâmetros variando a resistência ao embutimento
$t_1 = 30\text{mm}$ $t_2 = 30\text{mm}$ $6,3\text{mm} \leq d \leq 15,9\text{mm}$ $f_e = 15 \text{ Mpa}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$	$25\text{mm} \leq t_1 \leq 80\text{mm}$ $25\text{mm} \leq t_2 \leq 80\text{mm}$ $d = 6,3\text{mm}$ $f_e = 15 \text{ Mpa}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$	$t_1 = 30\text{mm}$ $t_2 = 30\text{mm}$ $d = 6,3\text{mm}$ $15 \text{ MPa} \leq f_e \leq 35 \text{ MPA}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$
$t_1 = 80\text{mm}$ $t_2 = 80\text{mm}$ $6,3\text{mm} \leq d \leq 15,9\text{mm}$ $f_e = 15 \text{ Mpa}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$	$25\text{mm} \leq t_1 \leq 80\text{mm}$ $25\text{mm} \leq t_2 \leq 80\text{mm}$ $d = 15,9\text{mm}$ $f_e = 15 \text{ Mpa}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$	$t_1 = 80\text{mm}$ $t_2 = 80\text{mm}$ $d = 6,3\text{mm}$ $15 \text{ MPa} \leq f_e \leq 35 \text{ MPA}$ $f_u = 540 \text{ MPa}$

Fonte: Autora (2024)

O software Microsoft Excel foi utilizado para realizar os cálculos paramétricos de resistência das conexões e para a elaboração de gráficos que facilitaram a comparação dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos com base nos critérios das normas ABNT NBR 7190 (1997) e ABNT NBR 7190-1 (2022) e são apresentados graficamente. Para cada modelo de ligação

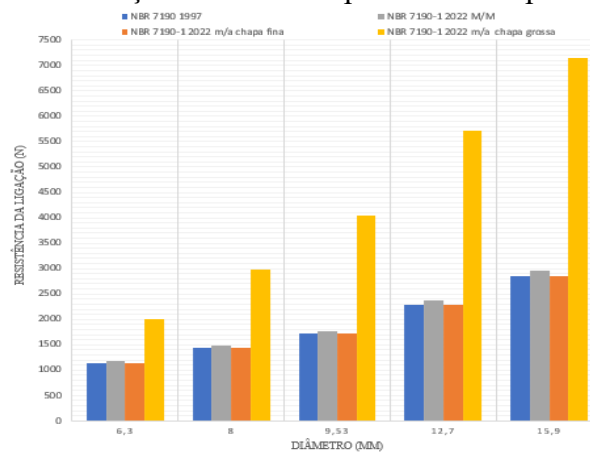
considerado nas análises, foi considerado sempre a menor resistência obtida considerando todos os modos de falha.

4.1 Resultados para ruptura por corte simples

4.1.1 Variação do diâmetro do pino

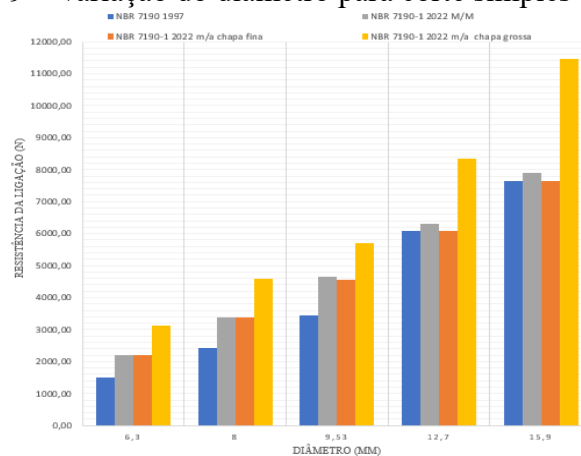
As figuras 8 e 9 apresentam os resultados da resistência da ligação com pino metálico para a série com espessura da madeira ($t=30\text{mm}$ e $t=80\text{mm}$), respectivamente, variando apenas o diâmetro, enquanto os valores de espessura, resistência ao embutimento da madeira e a resistência a ruptura do parafuso permaneceram fixados.

Figura 8 – Variação do diâmetro para corte simples $t=30\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 9 – Variação do diâmetro para corte simples $t=80\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

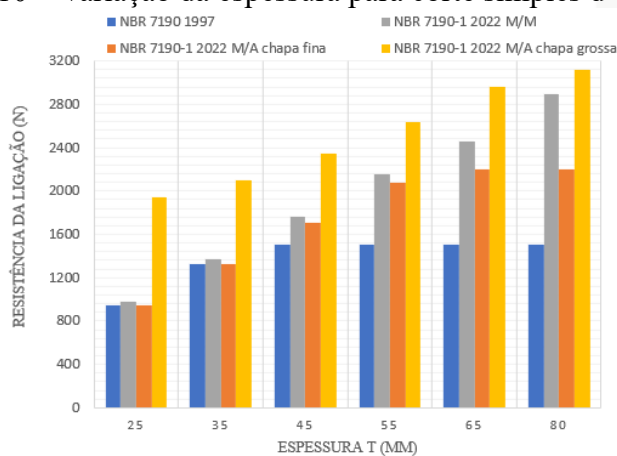
A análise do gráfico da Figura 8 permite observar o aumento da resistência da ligação, conforme o aumento do diâmetro do pino metálico. Além disso, nota-se que para ligação madeira–aço chapa fina, tanto a ABNT NBR 7190 (1997) quanto a ABNT NBR 7190-1 (2022) apresentaram o mesmo comportamento e os valores mais conservadores observados.

No entanto, ao analisar o gráfico apresentado na Figura 9, com uma espessura maior para a peça de madeira, observa-se um comportamento diferente à medida que o diâmetro varia. A ABNT NBR 7190 (1997) demonstra ser a mais conservadora, de forma semelhante ao observado na Figura 8.

4.1.2 Variação da espessura da madeira

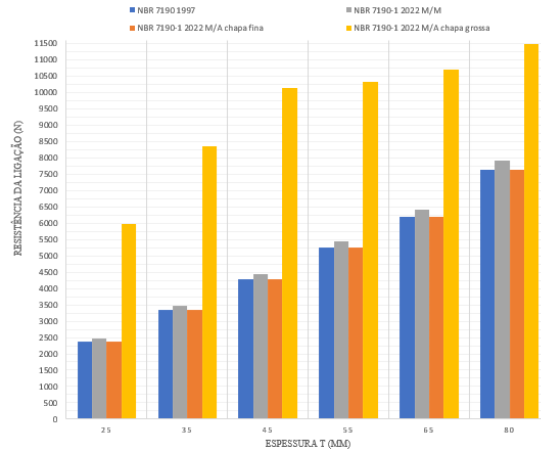
As Figuras 10 e 11 apresentam os resultados da resistência das conexões com pino metálico para diâmetros fixos de 6,3 mm e 15,9 mm, respectivamente. Nessa análise, as resistências ao embutimento da madeira e à ruptura do parafuso foram mantidas constantes, enquanto apenas a espessura da madeira foi variada.

Figura 10 – Variação da espessura para corte simples $d=6,3\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 11 – Variação da espessura para corte simples $d=15,9\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

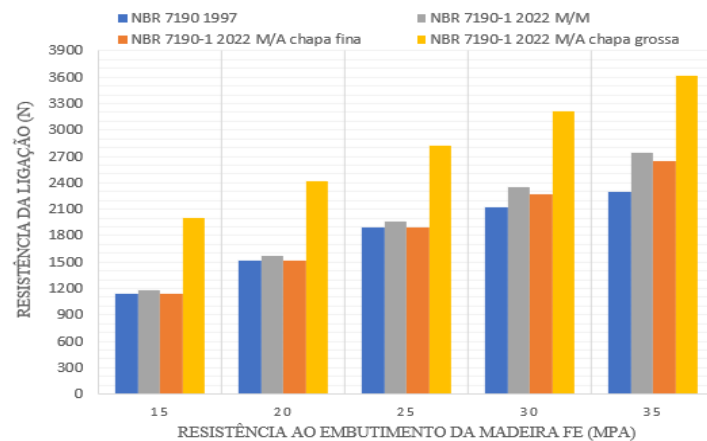
No gráfico apresentado na Figura 10, observou-se que conforme ocorre o aumento da espessura da madeira, maior a resistência da ligação, com exceção da ABNT NBR 7190-1 (2022) para ligações madeira-aço chapa fina, que a partir da espessura $t=65\text{mm}$ para o diâmetro $d=6,3\text{mm}$ apresentaram valores constantes de resistência. Tal mudança de comportamento é justificável, uma vez que a menor resistência entre os modos de falha é obtida pela Equação 28, que não considera a espessura da madeira em seu cálculo. Além disso verificou-se que a ABNT NBR 7190 (1997) apresentou ser a mais conservadora.

Através do gráfico apresentado na Figura 11, verificou-se um aumento constante na resistência da ligação conforme o aumento da espessura da madeira. Além disso, tanto a ABNT NBR 7190 (1997) quanto a ABNT NBR 7190-1 (2022) apresentaram os resultados mais conservadores para ligações entre madeira e aço de chapa fina.

4.1.3 Variação da resistência ao embutimento da madeira

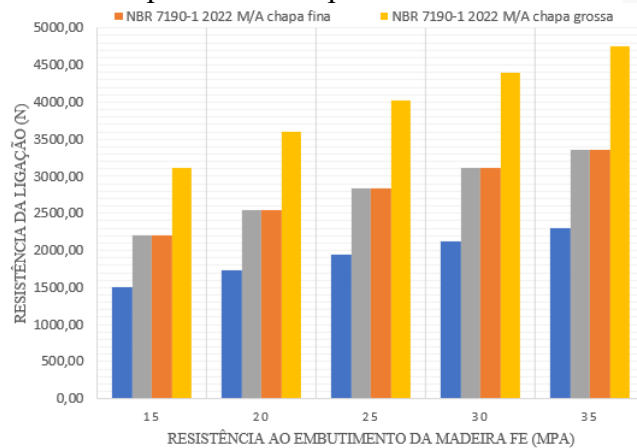
As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados da resistência da ligação com pino metálico variando apenas a resistência ao embutimento da madeira, permanecendo fixo os valores de diâmetro, espessura da madeira da madeira ($t=30\text{mm}$ e $t=80\text{mm}$) e a resistência a ruptura do parafuso.

Figura 12 – Variação da resistência ao embutimento da madeira para corte simples $t=30\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 13 – Variação da resistência ao embutimento da madeira para corte simples $t=80\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Pode-se observar nos gráficos das Figuras 12 e 13, que conforme ocorre o aumento da resistência ao embutimento da madeira, maior a resistência da ligação. De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Figura 12, observa-se que até a espessura $t=25\text{mm}$, as normas ABNT 7190 (1997) e ABNT 7190-1 (2022) para madeira-aço chapa fina apresentaram resultados semelhantes e com menor resistência quando comparado com as demais, mostrando-se mais conservadoras.

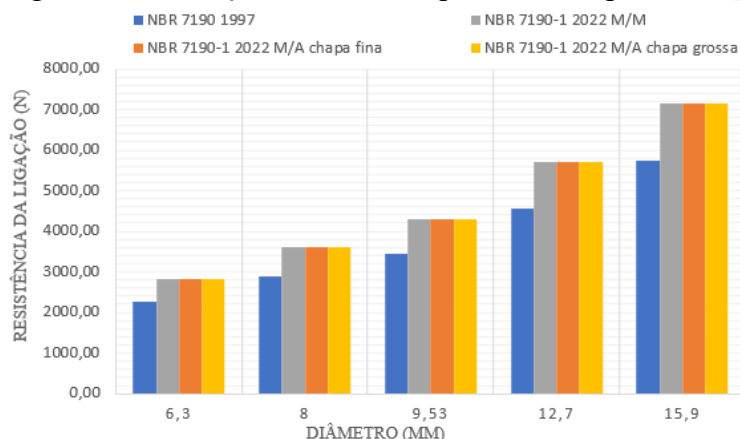
Já para os resultados obtidos para espessura $t=80\text{mm}$, a Figura 13 evidencia que a ABNT NBR 7190 (1997) demonstra ser a mais conservadora para o caso analisado.

4.2 Resultados para ruptura por corte duplo

4.2.1 Variação do diâmetro

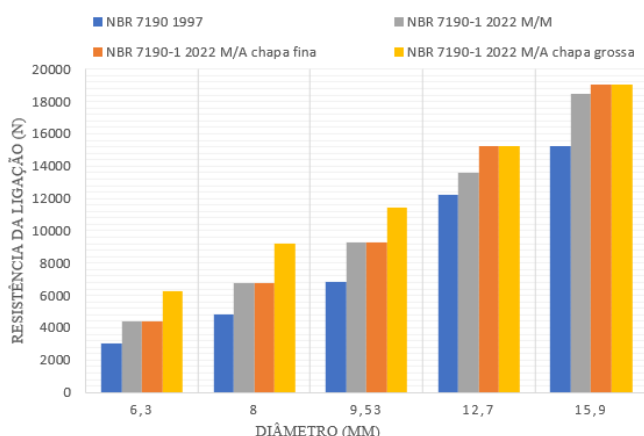
As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados da resistência da ligação com pino metálico em corte duplo, para a série com espessura $t=30\text{mm}$ e $t=80\text{mm}$, respectivamente, variando apenas o diâmetro do pino, enquanto os valores de espessura, resistência ao embutimento da madeira e a resistência a ruptura do parafuso permaneceram fixados.

Figura 14 – Variação do diâmetro para corte duplo $t=30\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 15 – Variação do diâmetro para corte duplo $t=80\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Ao observar os gráficos apresentados nas Figuras 14 e 15, é notável o aumento de resistência da ligação conforme o aumento do diâmetro do pino e que a ABNT NBR 7190 (1997) apresente ser a mais conservadora. Cabe ressaltar que a Figura 14 mostra que a resistência calculada pela ABNT NBR 7190-1 (2022) apresenta os mesmos resultados para os três tipos de ligações analisados. Isso se justifica pelo fato da resistência dessas ligações serem resultantes de equacionamentos semelhantes, conforme demonstrado pelas equações 23, 32 e 34.

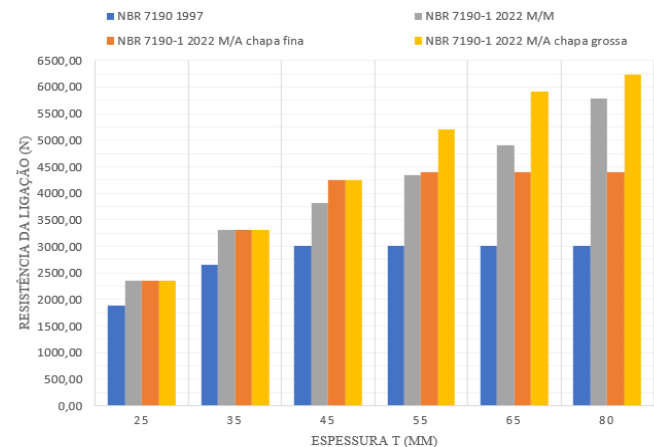
Na Figura 15 observa-se que, ao variar o diâmetro até 9,53mm, as ligações ABNT 7190-1 (2022) entre madeira- madeira e madeira-aço com chapas finas apresentam o mesmo resultado. Isso ocorre pois ambas as resistências foram definidas por equações semelhantes (Equação 25 e Equação

33). No entanto, ao aumentar o diâmetro até o valor de 15,9mm, esse comportamento foi alterado para ligações entre madeira e aço, que passaram a apresentar o mesmo resultado de resistência para chapa fina e chapa grossa. Isso ocorreu porque ambas as resistências foram definidas pelas Equações 24 e 32, que contemplam as mesmas variáveis.

4.2.2 Variação da espessura da madeira

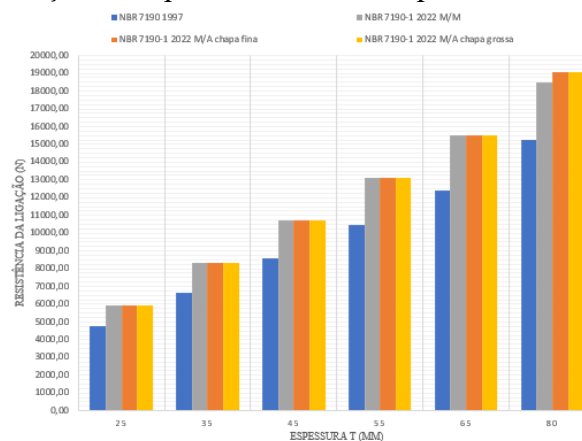
As Figuras 16 e 17 apresentam os resultados da resistência da ligação com pino metálico variando apenas diâmetro do pino metálico, permanecendo fixo os valores da espessura da madeira da madeira ($t=30\text{mm}$ e $t=80\text{mm}$), resistência ao embutimento da madeira e a resistência a ruptura do parafuso.

Figura 16 – Variação da espessura da madeira para corte duplo $d=6,3\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 17 – Variação da espessura da madeira para corte duplo $d=15,9\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

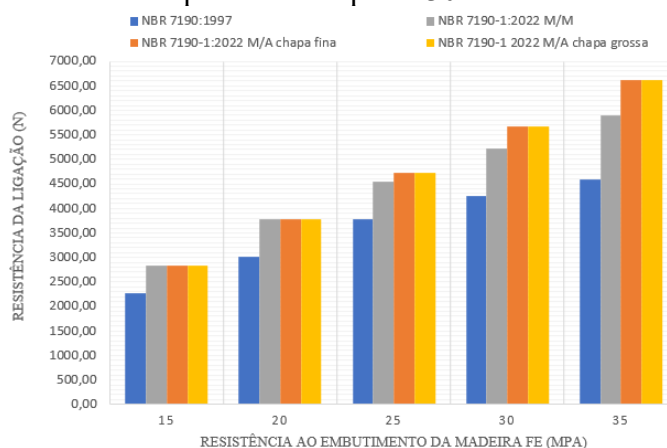
Os gráficos apresentados nas Figuras 16 e 17 evidenciam um aumento constante conforme o aumento da espessura da madeira. No entanto, ao analisar o gráfico apresentado na Figura 16, esse aumento não é observado para os resultados a partir da espessura de 45mm para o caso de ligações entre madeira e aço de chapa fina, referente a ABNT 7190-1 (2022). Esse comportamento é justificado por sua resistência ser definida pela Equação 25, que não leva em consideração a espessura da madeira.

No gráfico da Figura 17, observou-se que a ABNT 7190 (1997) apresenta ser a mais conservadora em relação as demais, além de que a ABNT NBR 7190-1 (2022) apresentou o mesmo comportamento para todas as ligações até a espessura de 65mm. Isso ocorreu devido à resistência dessas ligações serem definidas pelas Equações 23,32 e 34, que possuem parâmetros semelhantes.

4.2.3 Variação da resistência ao embutimento da madeira

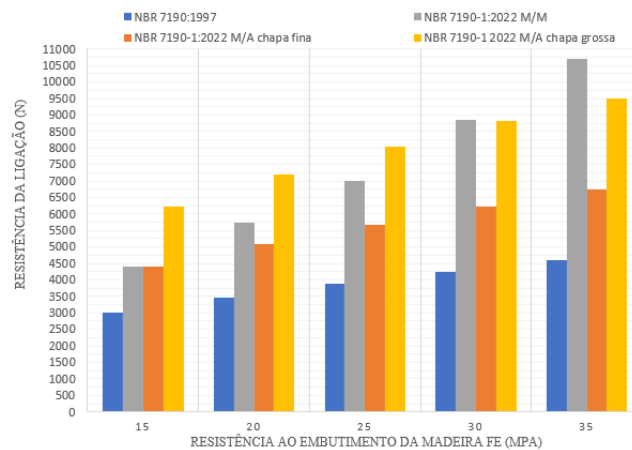
As Figuras 18 e 19 apresentam os resultados da resistência da ligação com pino metálico variando apenas a resistência ao embutimento da madeira, permanecendo fixo os valores diâmetro do pino metálico, a espessura da madeira da madeira ($t=30\text{mm}$ e $t=80\text{mm}$) e a resistência a ruptura do parafuso.

Figura 18 – Variação da resistência ao embutimento da madeira para corte duplo $t=30\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 – Variação da resistência ao embutimento da madeira para corte duplo $t=80\text{mm}$



Fonte: Autor (2024).

O gráfico apresentado na Figura 18 demonstra que a ANBT NBR 7190 (1997) apresenta menores resultados de resistência em relação a ABNT NBR 7190-1 (2022). É possível notar também que, para a ABNT NBR 7190-1 (2022), as ligações madeira-aço com chapa fina e chapa grossa apresentaram os mesmos resultados. Isso ocorreu devido à resistência dessas ligações serem definidas pelas Equações 32 e 34, que consideram exatamente as mesmas variáveis.

Ao analisar o gráfico da Figura 19, nota-se que a espessura da madeira e a resistência ao embutimento alteram significativamente a resistência da ligação, principalmente para a ABNT NBR 7190-1 (2022) entre madeira-madeira, conforme é evidenciado ao comparar com a Figura 18.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizado uma análise paramétrica de resultados obtidos em equações analíticas de resistência de ligações com pinos metálicos sob diferentes configurações, a afim de comparar a antiga norma ABNT NBR 7190 (1997) com a versão mais recente ABNT NBR 7190-1 (2022).

Dentre os parâmetros que influenciam na resistência das ligações, para obtenção dos resultados foram variados os valores de diâmetro do pino metálico, a espessura da madeira e a resistência ao embutimento da madeira, enquanto a resistência última característica à tração do pino metálico foi fixada em 540 MPa, correspondente a Classe 5.8.

Os resultados obtidos mostraram que:

- Em todas as ligações estudadas, a resistência aumentou ou se manteve constante à medida que os valores dos parâmetros estudados foram aumentados. Isso indica que, em todos os casos, o aumento dos valores dos parâmetros resulta em ligações mais resistentes.

- A ligação madeira aço chapa grossa referente a nova ABNT NBR 7190-1 (2022) foi a que, de maneira geral, apresentou os maiores resultados de resistência. Isso mostra que o cálculo realizado pela norma antiga era muito conservador quando comparado a norma nova.
- As ligações apresentaram menor eficiência em casos de seção de corte simples.
- A ABNT NBR 7190 (1997) apresenta ser a mais conservadora em todos os casos analisados, podendo ser utilizada a favor da segurança.
- Desconsiderando os casos em que a ligação entre madeira e aço de chapa fina referente a ABNT NBR 7190-1 (2022) se obteve os mesmos resultados de resistência a ligação entre madeira-madeira referente a ABNT NBR 7190 (1997), podemos observar a figura 12 sendo o caso mais crítico das ligações cujo ao variar a resistência ao embutimento da madeira para corte simples sendo $f_e=30\text{MPa}$ $d=6,3\text{mm}$ $t=30\text{mm}$ a ABNT NBR 7190 (1997) apresentou ser 6,35% mais conservadora.

Sugere-se, como continuidades deste estudo a realização de uma análise de custos entre as normas, considerando que na ABNT NBR 7190-1 (2022) ocorreu o melhor aproveitamento dos materiais ao apresentar resultados com maiores resistências para as ligações estudadas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo primeiramente a Deus e a Nossa Senhora por estar sempre junto a mim intercedendo por todas as conquistas que venho realizando, sempre me dando forças para que eu pudesse continuar seguindo os meus sonhos.

Aos meus orientadores Dionísio e Bruna, que dedicaram seu tempo durante toda essa pesquisa e que sempre foram uma referência como pessoa e profissionais durante todo o período letivo, tornando as aulas de estruturas mais leves e abordando conceitos usuais ao dia-dia.

Agradeço em especial a minha família que sempre me deram apoio, a minha mãe que sempre buscou meios para que tudo isso fosse possível e que nunca me deixou faltar nada, ao meu irmão que sempre me fez acreditar no meu potencial, pela sua compreensão em dias de estresse devido a semana de provas, as minhas tias que sempre me deram apoio e em qualquer apresentação de trabalho queriam estar ali presentes, ao meu esposo que sempre me apoiou com toda sua compreensão e carinho em dias difíceis, sempre me motivou e não permitiu que eu desistisse de realizar o curso.

Sou grata as amigas que foram feitas durante esses cinco anos, o que tornou essa caminhada mais leve e com significado. Em especial a Ana Paula, Hebert e Taílise.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

Disponível em: <<https://www.totalconstrucao.com.br/wp-content/uploads/2019/12/NBR-7190.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1: Projeto de estrutura de madeira**. Disponível em:

<<https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?Q=VmFKNzdveTg5b0Jpd0F1czJIYW8zOGlkRU9pbzFaNGpGTC9YVUR3WkJFWT0=>>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=MVNndVkvSDBGdEhKK09ROGhiWCt0UIJhdVhiM2lybFg=&Req=>>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

CARNEIRO, Núbia Conceição Bahia. **Estudo comparativo dos critérios de dimensionamento de ligações em estruturas de madeira considerando a norma europeia EUROCODE 5 e a norma brasileira NBR 7190**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021. Orientador: Prof. Dr. Wagner Queiroz Silva. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/5993/4/TCC_N%c3%babiaCarneiro.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.

ALMEIDA, Filipe André Leitão de. **A madeira como material estrutural: projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil — Especialização em Materiais e Processos de Construção) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012. Orientador: Prof. Dr. Afonso António de Serra Neves. Disponível em: <<https://repositorio.aberto.up.pt/bitstream/10216/72613/1/000155383.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2024.

DO VALLE, Ângela; DIAS DE MORAES, Poliana; SZÜCS, Carlos Alberto; TEREZO, Rodrigo Figueiredo. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, setembro de 2012. Apostila. Disponível em: <<https://giem.ufsc.br/files/2017/02/Apostila-Estrutura-de-Madeira.pdf>>. Acesso em: 14 de maio. 2024.

ALMEIDA, Filipe André Leitão de. **A madeira como material estrutural – projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil — Especialização em Materiais e Processos de Construção) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012. Orientador: Prof. Dr. Afonso António de Serra Neves. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1646722/mod_resource/content/1/Madeira%20como%20material%20estrutural.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2024.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, v. 9, p. 249-262, 1949. Disponível em: <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-me-001:1949:9::18#292>. Acesso em: 01/12/2024.

MAIA, Bruna Bernardi. **Resistência de ligações pregadas em madeira**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016. Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6353/3/CM_COECI_2016_1_06.pdf. Acesso em: 31/12/2024.

MENEZES, João Guilherme Lima. **Estudo comparativo e paramétrico de critérios teóricos e normativos aplicados às ligações por pinos em estruturas de madeira**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2023. Orientador: Prof. Me. Fabiano Medeiros da Costa. Coorientador: Prof. Dr. Davidson de Oliveira França Júnior. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/PASA-89RH5K>. Acesso em: 01/12/2024.

MOREIRA, Márcio Sampaio Sarmet. **Ligações estruturais de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pinos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br>. Acesso em: 1 dez. 2024.

PFEIL, Walter; PFEIL, M, **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. (6 edição). Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2810-1/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

RONDINELY, Francisco De Lima. **Parafusos: tipos mais comuns e para que serve cada um deles**. JW Engenharia, 2022. Disponível em: <https://jweng.com.br/noticias/tipos-de-parafusos-e-para-que-servem/>. Acesso em: 01 dez. 2024.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 978-85-216-3797-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637974/>. Acesso em: 7 maio 2024.

TOMAZ, Daniel Ferreira. **Fenômenos de segunda ordem em ligações parafusadas em madeira**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/6362>. Acesso em: 05 mar. 2024.